

文章编号: 1001-3806(2011)04-0554-05

激光起爆系统光路完整性检测技术研究

尹国福, 鲁建存*, 刘彦义, 贺爱峰, 曹椿强

(中国兵器工业第213研究所 火工品安全性可靠性技术国防科技重点实验室, 西安 710061)

摘要: 针对激光起爆系统可能会出现起爆光路的不完整从而影响正常的起爆, 设计了激光起爆系统自相关检测和互相关检测两种不同的光路完整性检测结构, 并对两种结构进行了理论分析和对比。结果表明, 自相关检测结构可以检测到激光起爆器回馈光纤中回波信号的最小功率为 100nW, 互相关检测结构能检测到激光起爆器回馈光纤中回波信号的最小功率为 0.1nW。在满足检测激光功率最大为 0.2mW 的条件下, 前者不能实现起爆光路完整性的检测, 而后者可实现起爆光路完整性的检测。

关键词: 激光技术; 激光起爆; 微弱光信号; 光纤传能; 相关检测; 双光纤

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.028

Testing techniques for optical path integrity in a laser initiator system

YIN Guo-fu, LU Jian-cun, LIU Yan-yi, HE Ai-feng, CAO Chun-qiang

(National Defence Key Laboratory for Safety and Reliability of Pyrotechnical, The 213th Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to escape unsuccessful initiation from non-integrity of the optical path in a laser initiation system, both autocorrelation detection and cross-correlation detection were designed and compared. The experimental results show that the lowest detectable power of echo signal of laser initiator feedback fiber is 100nW for autocorrelation detection, 0.1nW for cross-correlation detection respectively. When the laser power is less than 0.2mW, the integrity of the optical path can be detected with cross-correlation detection, but cannot with autocorrelation detection.

Key words: laser technique; laser initiator; feeble light signal; fiber delivery energy; correlation detection; dual-fiber

引言

随着现代化战争中电子对抗、电磁武器的使用, 战场上的电磁环境日渐恶化, 使抗干扰强的激光起爆技术^[1-2]在国内外得到迅速的发展。但是, 激光起爆系统可能会因光纤折断、端面污染、光开关损坏等原因出现起爆光路的不完整性^[3-7], 从而影响正常的起爆过程。因此, 建立具有起爆光路完整性检测功能的激光起爆系统是非常必要的。即在起爆之前, 以不影响激光起爆器性能的小功率激光进行光路完整性检测, 当检测结束, 结果表明, 系统光路完整时, 以较大的激光功率完成起爆, 这样就提高激光起爆的可靠性。国外早在 20 世纪 80 年代就开展了相关研究。以激光器的工作模式分类, 主要采用双波长工作模式检测^[8-11]和单波

长工作模式检测(同一波长的激光, 小功率时检测, 大功率时起爆)^[12-13]两种不同方式实现起爆系统光路完整性的检测。国内, 中国兵器工业第 213 所在“十一五”期间开展了双光纤结构激光起爆系统单波长工作模式检测的原理性研究^[14], 但检测灵敏度低, 不得不增大检测激光的功率实现检测。由于检测激光功率偏大, 影响了激光起爆器的性能, 进而影响了激光起爆的可靠性。

其实, 无论是单波长工作模式的检测还是双波长工作模式的检测, 最终都要归结到对微弱光信号的检测。微弱光信号检测最常用的方法是相关检测和相干检测。自相关检测和互相关检测均属于相关检测, 是通过利用信号有良好时间相关性和噪声的不相关性(在短时间内部分相关), 使信号进行积累而噪声不积累的原理, 从而把噪声淹没的信号提取出来。相干检测是通过两束光的干涉, 改善检测系统的频率选择性, 增强被检信号的抗干扰能力的方式, 提取有用信号, 而零差检测和自差检测是相干检测中的两种特殊形式而已, 这两种方式主要通过检测被检信号的幅度和相位

基金项目: 总装“十一五”预先研究基金资助项目

作者简介: 尹国福(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事微弱光信号的探测与处理的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yinguofu521@126.com

收稿日期: 2010-09-13; 收到修改稿日期: 2010-11-17

来实现。

为解决激光火工品系统光路完整性检测灵敏度低,不得不以增大检测激光功率来实现检测的问题。本文中建立了具有检测功能的激光起爆系统光路完整性自相关检测结构与互相关检测结构两种不同的结构,实现起爆光路完整性的检测,提高了激光起爆的安全性和可靠性,以满足武器、航空、航天或其它领域的需要。

1 激光起爆系统

控制器发出触发信号使半导体激光器输出小功率的检测光,通过光纤、光纤连接器以及衰减器传输到激光起爆器耦合窗口的分色滤光膜上,并将其反射到双光纤的回馈光线中进行检测,如果能检测到回波信号存在并且其功率不小于起爆光路完整时的功率(此数据经实验确定),可认为起爆光路不存在光纤折断、断面污染等情况,即起爆光路完整无缺。此时,控制器便可发出另一触发信号,使大功率的起爆激光源输出单脉冲激光完成起爆过程。双光纤结构激光起爆系统示意图如图 1 所示。

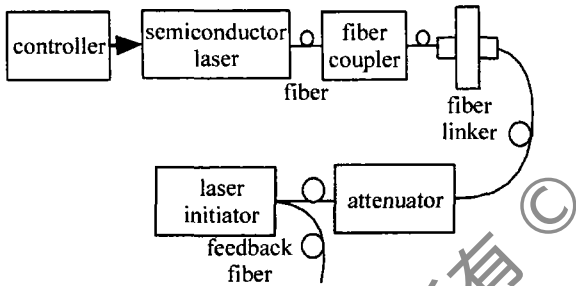


Fig. 1 Laser initiation system with dual-fiber

研究中采用波长为 650nm 的激光作为激光起爆系统检测光,波长为 980nm 的激光作为起爆激光,所以在聚焦格林透镜后端面镀对 650nm 激光全反射、而 980nm 激光全透射的分色滤膜。本次设计膜系设计采用了常用的冷光镜用膜系。12 层的 SiO₂/TiO₂ 膜系作为设计基础膜系,其膜系为:基底|(HL)⁶|空气。经实验测得分色滤光膜的透过率如图 2 所示。

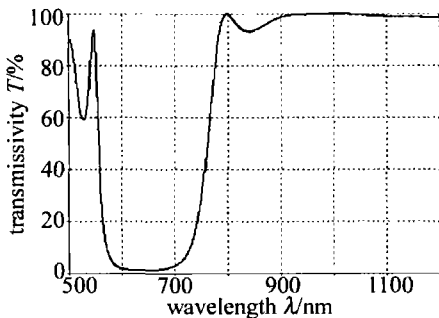


Fig. 2 Transmissivity of spectrum splitting filter film

由曲线可知,分色滤光膜对波长 600nm 至 700nm 之间激光全反射,而对于波长大于 800nm 的激光全反

射,所以采用 650nm 激光作为检测光,以 980nm 激光作为起爆激光。

2 激光起爆系统检测结构

无论是激光起爆系统的双波长工作模式的检测还是单波长工作模式的检测,最终都要归结到对系统中微弱的回波信号的检测。因为在检测阶段,检测激光的功率必须小于激光起爆器最大不发火功率的 1/100^[11],而激光起爆器的最大不发火功率约为 20mW,所以检测激光的功率最大也只能为 0.2mW。经实验测得激光起爆器的耦合窗口耦合到双光纤回馈光纤中的耦合率约为 10⁻⁵,所以,真正所要检测的激光回波信号功率最大为几纳瓦。检测如此微弱的光信号易受到外界的干扰,使检测系统的信噪比降低、稳定性变差。因此,建立了激光起爆系统自相关检测结构和互相关检测结构两种不同的起爆光路完整性检测结构,提高检测双光纤回馈光纤中微弱光信号的灵敏度。如果检测灵敏度提高,那么在实现起爆光路完整性检测的条件下,可降低检测激光的功率,从而减小了检测激光对激光起爆的影响,如此,激光起爆的可靠性更高。

2.1 激光起爆系统自相关检测结构以及理论分析

半导体激光输出激光信号经分束器分为两路,其中一路 $s(t)$ 直接传输到激光起爆器的换能元件(自聚焦透镜镀膜分色滤光膜)后将其反射并最终传输到合束器中。另一路 $s(t)$ 经延时器延时后输出 $s(t-\tau)$ 传输到合束器。 $s(t)$ 与 $s(t-\tau)$ 在光电探测器进行混频后(因两束光满足干涉条件,所以两束光在合束器端面发生干涉,实现混频),将光信号转化为电信号,再对电信号进行放大、滤波等相关处理。其原理示意图如图 3 所示。

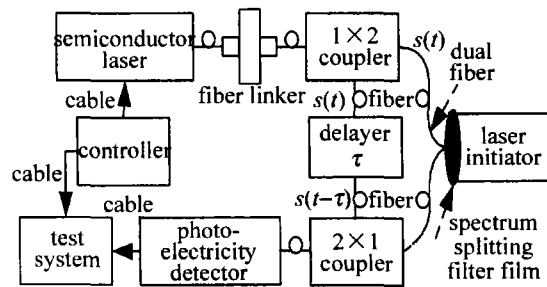


Fig. 3 Block diagram for autocorrelation detection in a laser initiation system

设分束器两端输出光信号和噪声的总和为:

$$f_i(t) = s_i(t) + n_i(t) \tag{1}$$

分束器 1 端输出的信号输入到激光起爆器双光纤的发光光纤中,并经激光起爆器耦合窗口耦合到回馈光纤中输出 $f_i(t)$ 。分束器 2 端输出的信号延时 τ 后得到 $f_i(t-\tau)$ 。两路信号在合束器熔接点和光电探测器端面处发生干涉,实现混频,即在此处实现了信号自相关

处理。其原理如图4所示。

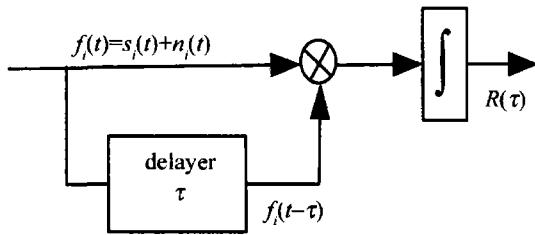


Fig. 4 Block diagram for autocorrelation detection

输出信号 $R(\tau)$ 为:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_i(t) f_i(t - \tau) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [s_i(t) + n_i(t)] [s_i(t - \tau) + n_i(t - \tau)] dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left[\int_{-T}^T s_i(t) s_i(t - \tau) dt + \int_{-T}^T n_i(t) s_i(t - \tau) dt + \int_{-T}^T s_i(t) n_i(t - \tau) dt + \int_{-T}^T n_i(t) n_i(t - \tau) dt \right] \quad (2)$$

整理得到:

$$R(\tau) = R_{s,s}(\tau) + R_{s,n}(\tau) + R_{n,s}(\tau) + R_{n,n}(\tau) \quad (3)$$

式中, $R_{s,s}(\tau)$ 是反馈光纤中回波信号的自相关函数, $R_{s,n}(\tau)$, $R_{n,s}(\tau)$ 分别是回波信号与噪声、噪声与回波信号的叠加函数; $R_{n,n}(\tau)$ 是噪声的自相关函数, T 为信号周期。

由于微弱光信号与噪声的主要区别在于频谱特性、统计特征等方面,而不是它们的强度差别。微弱光信号具有良好的时间相关性,而噪声不具有时间上的相关性。那么,回馈光纤中的回波信号与噪声不相关,并且噪声的平均值为0,因此有:

$$R_{s,n}(\tau) = 0, R_{n,s}(\tau) = 0 \quad (4)$$

则有:

$$R(\tau) = R_{s,s}(\tau) + R_{n,n}(\tau) \quad (5)$$

由平稳随机过程理论可知:不含周期分量的噪声 $n_i(t)$ 的自相关函数当 $\tau \rightarrow \infty$ 时, $R_{n,n}(\tau) \rightarrow 0$, 所以当 τ 很大时有:

$$R(\tau) = R_{s,s}(\tau) \quad (6)$$

然而,在激光起爆系统光路完整性检测中,由于检测过程极短,所以实验中延时 τ ($\tau = 5\text{ns}$) 并不趋于 ∞ , 则 $R_{n,n}(\tau)$ 不趋于0, 自相关处理后输出仍为如(5)式所示。

这表明,经自相关处理后,保留了目标信号特性和系统噪声特性,即保留了与回馈光纤中的回波信号相应的电信号和噪声,电信号经检测系统的采集、放大与滤波等处理后输出与回波信号功率大小相应的电压信号。

如果检测系统显示一定电压并电压值不小于起爆

光路完整时的输出电压,那么,说明起爆光路完整无缺。如果检测显示的电压小于起爆光路完整时的电压或者检测系统根本不显示数据,则说明起爆光路不完整。必须进行核查,排除隐患,直至起爆光路不存在任何问题时完成起爆过程。

2.2 激光起爆系统互相关检测结构以及理论分析

半导体激光器发出频率为 ω 激光经分束器将其分为两路,一路 $s(\omega t)$ 从双光纤的一端直接传输到激光起爆器的耦合窗口(自聚焦透镜镀反射膜),将其反射到双光纤的回馈光纤并传输到合束器中。同时,另一路 $s(\omega t)$ 经移频器移动一定频率 Ω ($0 < \Omega \ll 1$) 后输出 $s[(\omega + \Omega)t]$ 进入合束器。但是,两束光可能在移频和反射后偏振态发生变化而不满足干涉条件,所以利用动态偏振态控制器或光纤寄生偏振态测试仪,对两束光进行定量偏振态调节以满足在光电探测器端面上发生干涉,完成两束光的混频。混频后信号有3个分量: $A_0 \exp(i\omega t)$, $A_r \exp[i(\omega + \Omega)t]$, $A_r \exp[i(\omega - \Omega)t]$ 。显然, $A_r \exp[i(\omega - \Omega)t]$ 是干涉产生的成分。其有着非常特殊的意义,因为其幅度 A_r 反比于频率失谐,例如在一定的条件下 $A_r \propto 1/|\Omega|$ 。在频率失谐较小的情况下 ($\Omega \ll 1$), 干涉产生信号幅度 A_r 极大地放大了输入光信号。干涉后的光信号传输到光电探测器转换为电流信号,其频率为 $\omega, \omega + \Omega, \omega - \Omega$ 。利用锁相放大器将频率为 $\omega + \Omega$ 的分量与频率为 Ω 的参考方波信号相乘后积分输出。其示意图如图5所示。

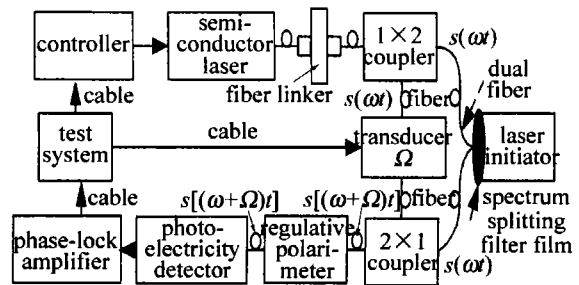


Fig. 5 Block diagram of cross-correlation detection in a laser initiation system

设分束器两端输出的信号和噪声总和为:

$$f_i(t) = s(\omega t) + n_i(t) \quad (7)$$

分束器1端输出的光信号传输到激光起爆器双光纤的发火光纤中,并通过激光起爆器耦合窗口耦合到回馈光纤输出:

$$f_1(t) = s_1(\omega t) + n_1(t) \quad (8)$$

分束器2端输出信号移频 Ω 后得到:

$$f_2(t) = s_2[(\omega \pm \Omega)t] + n_2(t) \quad (9)$$

通过调整动态偏振态调振器和移频器使两路频率近似的信号,在合束器熔接点和光电探测器端面处发生干涉,实现两束光的混频,即实现互相关原理检测,输出

信号为:

$$R_{f,s} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_1(t) f_2(t) dt =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [s_1(\omega t) + n_1(t)] [s_2[(\omega \pm \Omega)t] +$$

$$n_2(t)] dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left[\int_{-T}^T s_1(\omega t) s_2[(\omega \pm \Omega)t] dt + \right.$$

$$\left. \int_{-T}^T n_1(t) s_2[(\omega \pm \Omega)t] dt + \int_{-T}^T s_1(\omega t) n_2(t) dt + \int_{-T}^T n_1(t) n_2(t) dt \right] \quad (10)$$

整理得到:

$$R_{f,s} = R_{s_1,s_2} + R_{n_1,s_2} + R_{s_1,n_2} + R_{n_1,n_2} \quad (11)$$

因反馈光纤中的回波信号与随机噪声的发生相互独立互不相关,噪声与噪声在时间上也不相关。根据互相关函数的特性^[15]:

$$R_{f,s} = R_{s_1,s_2} \quad (12)$$

$$R_{n_1,s_2} = R_{s_1,n_2} = R_{n_1,n_2} = 0 \quad (13)$$

这表明经过互相关处理后,保留了与反馈光纤中的回波信号相应的电信号,抑制了噪声。电信号经检测系统的采集与处理后输出与回波信号功率大小相应的电压信号。

该系统的起爆光路完整性的判断与激光起爆系统自相关检测结构的判断方法一致,在此不予重复。

3 实验及结果分析

实验中检测激光选用 650nm 模拟激光,其功率可调,最大功率为 10^{-4} W,重频为 1kHz,脉冲宽度为 20ns ~ 30ns。在分束器的输出端 1 利用 RJ7200 探测器先将即将输入到激光起爆器双光纤发火光纤中的光信号转换为电信号,并将其输入到计算机中利用软件处理后得出输入光功率 P_1 的大小,如图 6 所示。然后再将分束器的输出端 1 用光纤连接器连接到激光起爆器双光纤的发火光纤中,而分束器的输出端 2 连接在延时器或移频器上。然后,在各自的检测系统处记录经处理后的电压 U 的大小即可。

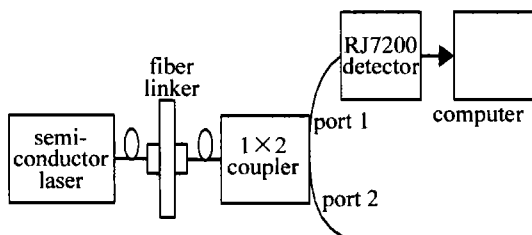


Fig. 6 Sketch map of input optical power testing

光功率 P_1 乘以双光纤结构激光起爆器的耦合窗口耦合到回馈光纤的耦合率 10^{-5} ,便可得到回馈光纤中的回波信号的功率 P 。如此,可作出回馈光纤回波信号功率 P 与检测系统输出电压 U 的曲线,见图 7。

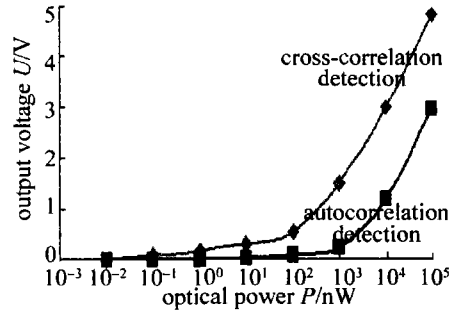


Fig. 7 Power P of feedback fiber echo signal vs. output voltage U

由试验测得激光起爆系统自相关检测结构所能检测到的最小光功率 $P(t) \approx 100$ nW,此时检测系统输出的电压约为 0.2V。激光起爆系统互相关检测结构所能检测到的最小光功率 $P(t) \approx 0.1$ nW,此时检测系统输出的电压约为 0.1V。造成两种检测结构所能检测的微弱程度不同的原因在于:自相关检测输出为(5)式,互相关输出为(12)式。由此可知,互相关检测的信噪比比自相关检测的信噪比要高,所以,互相关检测所能检测的微弱信号功率更小,即灵敏度更高。

这表明,激光起爆系统互相关检测结构的检测灵敏度比自相关检测结构的高,抑制噪声的能力也强。如果要实现起爆光路完整性的检测,激光起爆系统自相关检测结构的检测光功率要比互相关结构的检测光功率大。

4 结论

激光起爆系统起爆光路完整与否将影响激光起爆的可靠性。所以,针对激光起爆光路可能会存在不完整的问题,利用激光起爆系统自相关检测结构和互相关检测结构两种不同结构进行了起爆光路完整性的检测,最后得出以下结论:(1)在满足检测激光功率必须小于激光起爆器最大不发火功率(0.2mW)的 1/100 条件下,目前激光起爆器耦合窗口的耦合效率约为 10^{-5} ,激光起爆系统自相关检测结构因灵敏度较低而不能实现起爆光路完整性的检测,而激光起爆系统互相关检测结构因具有较高的灵敏度可实现起爆光路完整性检测;(2)激光起爆系统互相关检测结构的灵敏度比较高,所以,可降低检测激光的功率以减小对激光起爆器性能的影响,提高激光起爆的可靠性;(3)激光起爆器耦合窗口的耦合效率不稳定,对检测产生了一定影响,所以,提高耦合效率并将其的波动范围缩小非常必要。

参考文献

[1] ZHAO X H, GAO Y, CHENG Y Sh. A summary of laser ignition technology[J]. Laser Technology, 2007, 31 (3) : 306-310 (in Chinese).
 [2] ZHAO X H, GAO Y, ZHAO X. Development of laser initiation tech-

- nology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5):797-802 (in Chinese).
- [3] ROMAN N B M. Laser ignition of explosives and its application in a laser diode based ignition system[C]//Proceedings of the 16th International Pyrotechnics Seminar. Jonkoping, Sweden: IPS USA, 1991: 1-8.
- [4] BARGLOWSKI M. Laser initiated ordnance systems advancements in system performance and reliability [C]//37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Salt Lake City, USA; AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2001: 1-8.
- [5] BARGLOWSKI M. Intergrated system test methods for laser initiated ordnance system[C]//34th AIAA/ASME/SAE/ASERE Joint propulsion Conference & Exhibit. Cleveland, USA; AIAA/ASME/SAE/ASEE, 1998: 1-12.
- [6] BARGLOWSKI M. Laser initiated ordnance systems advancements in system performance and reliability [C]//36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Detroit, USA; AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2011: 1-6.
- [7] BARGLOWKI M, BOUCHER C. Performance of next generation LFU optical built in test system[C]//34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Huntsville, Australia; AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2000: 1-10.
- [8] SUMPTER D R. Laser ignition devices using for air to air missile [C]//1th NSNA. Washington: NSNA, 1992: 137-147.
- [9] RICHARD J. Laser initiated ordnance system optical fiber continuity test; US, 5270537 [P]. 1993-12-14.
- [10] WOOD L A, CALDWELL P J. Photoluminescence built-in-test for optically initiated systems; US, 5572016 [P]. 1998-11-05.
- [11] ALEXANDER B, RESTON D. Criteria for explosive systems and devices used on launch and space vehicles [C]//42th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. San Diego, Canada; AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2005: 1-8.
- [12] FOLSOM M F, CALLAGHAN J D. Dual fiber laser initiator and optical telescope; US, 5914458 [P]. 1999-06-22.
- [13] FAHEY W D, CARVALHO J E. Optical built-in-test (BIT) for laser (diode) initiation systems [C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis, USA; AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2002: 1-11.
- [14] ZHOU H, LU J C, LIU Y Y, *et al.* The measurement of external self-testing for laser initiation system [J]. *Initiator & Pyrotechnics*, 2008, 1(1): 43-45 (in Chinese).
- [15] AN Y Y, ZENG X D. Photoelectricity detect principle [M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2004: 206-209 (in Chinese).

(上接第 553 页)

灸穴位区域组织的漫射率等组织特性及对针灸位置进行定位,对现在的经络研究有特别意义,可为深入研究人体经络特性提供基础。

参 考 文 献

- [1] JOHNG H M, CHO J H, SHIN H S, *et al.* Frequency dependence of impedances at the acupuncture point Quze (PC3) [J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 2002, 21(2): 33-36.
- [2] WHITTAKER P. Laser acupuncture: past, present, and future [J]. *Lasers in Medical Science*, 2004, 19(2): 69-80.
- [3] CHOI C, SOH K S. Study of propagation of light along an acupuncture meridian [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2003, 7(6): 244-247 (in Korean).
- [4] McNALLY K M, SORG B S, WELCH A J, *et al.* Photothermal effects of laser tissue soldering [J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1999, 44(4): 983-1002.
- [5] WANG X C, GONG Y J, SONG D C, *et al.* The spatially resolved scattered reflection of three layered matched media diffusion equation in the steady-state [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 25(3): 377-381 (in Chinese).
- [6] KIENLE A, PATTERSON M S. Improved solutions of the steady-state and the time-resolved diffusion equations for reflectance from a semi-infinite turbid medium [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1997, A14(1): 246-254.
- [7] LAI J Ch, LI Zh H, WANG Zh D, *et al.* System model of light transporting in biological tissues and its application [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(7): 1312-1317 (in Chinese).
- [8] WANG Sh, RUAN J, HE Q L. Study on photo-damage selectivity in photodynamic therapy by means of Monte Carlo method [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 184-186 (in Chinese).
- [9] WEI P F, ZHAO Y Q, LIANG Y, *et al.* Monte Carlo simulations of polarized light transport in multilayered scattering media [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(10): 2634-2639 (in Chinese).
- [10] LI Zh H, LAI J Ch, WANG Zh D, *et al.* The application of impulse response function in Monte Carlo simulation of light distribution in biological tissues [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(4): 263-268 (in Chinese).
- [11] DOOMBOS R M P, LANG R, ALDERS M C, *et al.* The determination of in vivo human tissue optical properties and absolute chromophore concentrations using spatially resolved steady-state diffuse reflectance spectroscopy [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1999, 44(3): 967-981.